

氏 名 POSCH Paul

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1594 号

学位授与の日付 平成25年3月22日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Charm resonances in semi-leptonic B decays

論文審査委員 主 査 教授 橋本 省二
教授 岡田 安弘
教授 野尻 美保子
教授 萩原 薫
准教授 中尾 幹彦
准教授 清 裕一郎 順天堂大学

Abstract

In this work we study the contribution of the charm resonances to the process $B \rightarrow K^{(*)}l+l-$ which arise through intermediate charmonia via $B \rightarrow K^{(*)}l+l-$. We give estimates of the color-octet contribution to the decay and calculate the hard and soft spectator corrections in the soft-collinear effective theory and the potential non-relativistic QCD framework, which models the quarkonium as a coulomb bound state. The short distance corrections to the $sb\bar{c}c$ vertex of order $O(v^2\alpha_s)$ to the S-wave quarkonium vectors are also presented for the first time. We discuss effects how these corrections affect observables of $B \rightarrow K^{(*)}l+l-$ which are being measured at collider experiments.

Introduction

B physics has brought us great tools to search for indirect evidence of new physics. One of the most impressive constraint is the $b \rightarrow s\gamma$ constraint, which has been determined up to the several 10% level experimentally and theoretically. One expects $b \rightarrow sll$ or its hadronic partner $B \rightarrow K^{(*)}l+l-$ to fulfill a similar role in the future. Impressive measurements of $B \rightarrow K^{(*)}l+l-$ were performed with LHCb, CDF, Belle and BaBar. With the LHCb showing the most precise measurement at only 1.0 fb^{-1} , we can expect these observables to be quite accurately measured in the future.

On theoretical side in the last 10 years frameworks have been developed to handle the large recoil region (i.e. for a small invariant dilepton mass) in the soft-collinear effective theory (SCET) approach. On the other hand for the low recoil region (i.e. a very large invariant dilepton mass) an operator product expansion formalism was introduced by Grinstein et. al and expanded by Bobeth et al..

For the invariant dilepton mass approaching the J/ψ and ψ' masses, resonance effects become important. However, an appropriate formalism to treat this resonances is still missing. As seen in the plots of $B \rightarrow K^{(*)}l+l-$ at present in the experimental analysis one usually drops the data of the region where the charmonium resonances contribute. As new data is constantly accumulated by LHCb, a full experimental analysis of the differential branching width over the whole range of invariant lepton mass will soon be feasible, and accordingly it will be necessary to improve the theoretical prediction in the resonance region. In this work we hence focus on this resonance region where $s \lesssim M_{\{J/\psi, \psi'\}}^2$, which lies right between these two regions where theoretical frameworks were developed. Previous studies used the naive factorization approach, which models the cc resonances as vector particles which do not exchange gluons with the sb vertex.

The problem of this approach is that it yields a branching ratio $\text{Br}(B \rightarrow K^* l^+ l^-) = \text{Br}(B \rightarrow K^* V) \text{Br}(V \rightarrow l^+ l^-)$ which, depending on the resonance, is too small by a factor of 1.5-4.

This is usually only manually rectified by introducing an adhoc fudge factor in the propagator to correct for this shortcoming. It is the purpose of our study to calculate the corrections to the naive factorization and to empirically study its effects on observables in decays like $B \rightarrow K^* l^+ l^-$ and to provide estimates for various categories of higher order effects in the resonance region.

In Chapter 2 we discuss the methods currently employed to treat the resonance effects and the heavy-to-light current sb. Chapter 3 introduces the formalism of Potential Non-relativistic Quantum Chromodynamics (PNRQCD) and Soft Collinear Effective Theory (SCET) in which we will treat the resonances. In Chapter 4 we introduce the PNRQCD/SCET operators needed for our calculation up to $O(v^2 \alpha_s)$ and confirm that our formalism reproduces the naive factorization result at the leading order, while Chapter 5 presents the one-loop correction to the $B \rightarrow K^* V$ vertex. Chapter 6 show our results, while Chapter 7 discusses the experimental observables and performs a numerical analysis on them. We conclude in Chapter 8 and deal with the more complicated calculations to the Appendices.

Conclusion

In this work we calculated corrections to the naive factorization of the process $B \rightarrow K^* (V \rightarrow l^+ l^-)$ in the framework of PNRQCD/SCET. Utilizing this framework first applied in Beneke, Vernazza et al. for B mesons into P-waves and the K meson (i.e. $B \rightarrow K^* V$), we derived for the first time estimations of the corrections to the naive factorization in $B \rightarrow K^* (J/\psi, \psi')$. We calculated the $O(v^2 \alpha_s)$ short distance corrections to the vertex sb cc, and the long distance contribution of the color-octet. We showed that IR divergencies of $O(v^2 \alpha_s)$ of the short distance corrections cancel with UV divergencies of the long distance color-octet contribution. UV divergencies in the long distance color-octet contribution of order α_s still remaining after this cancellation are expected to cancel by the 3-loop $O(\alpha_s^3)$ hard vertex contribution which were not calculated and are left as work for the future.

We found that the color-octet contribution to the vertex is finite only for the K^* vector meson, while it is zero for the K meson. Its contribution leads to an imaginary part only for lepton invariant masses above the J/ψ mass threshold and is hence very small. For the overall size of the corrections, we found the color-octet contribution and the hard vertex correction of $O(v^2 \alpha_s)$ to be only a few percent of the tree-level contribution and therefore quite small. The largest contributions were the hard vertex

contributions of $O(\alpha s)$, as well as the soft spectator interaction, which both give contributions of the order of the tree-level.

Furthermore, both the hard vertex and the soft spectator contribution were found to yield a sizeable imaginary part. The overall contribution is too big for the results we have from experiments for $B \rightarrow K^*(J/\psi, \psi')$, while for $B \rightarrow K(J/\psi, \psi')$ they yield the correct order. This suggests that other corrections, most likely higher order hard spectator scattering and hard vertex contributions of $O(\alpha s^2)$ not calculated in this work are expected to change the current result.

博士論文の審査結果の要旨

Paul Posch 君の博士論文の内容は、B中間子のレプトン対を含む崩壊過程の理論的な計算法の改良である。

$b \rightarrow s \cdot$ や $b \rightarrow s11$ などのbクォーク崩壊過程は、素粒子標準模型のツリー近似では禁止されており、高次補正の効果により生ずることが知られている。そのため、標準模型以外の効果を探るために有効な過程と考えられる。実験的には、特に $B \rightarrow K11$ や $B \rightarrow K*11$ 過程は、Belle, BaBar 実験に加えてLHCb実験においても統計精度の高いデータが得られており、現在建設中のSuperKEKB/Belle IIにおいてはさらなる進展が期待される。

一方、これらの過程の理論計算には課題が残されている。特に $B \rightarrow K(*)11$ 過程は、チャーモニウム状態を経てレプトン対に崩壊する過程が崩壊振幅のレベルで重なるので、レプトン対の不変質量分布を J/ψ や ψ' のレゾナンス近傍で予言するには、束縛状態に特有な計算の困難が伴うことが指摘されている。これに対し、これまでは主に単純な因子化 (naïve factorization) の計算式に現象論的な定数を導入するという、理論的には不満足な方法がとられてきた。

この博士論文の研究は、この点を改良することを目指し、QCDに基づいた有効理論を用いて $B \rightarrow K(*)11$ 過程の計算を遂行したものである。チャーモニウム束縛状態を記述するため、ポテンシャル非相対論的QCD (pNRQCD) という有効理論を用いている。この理論形式では、束縛状態やレゾナンス状態を表す場を導入することで、低エネルギー領域 (ソフト領域) の寄与と、より高いエネルギー領域 (ハード領域) のQCD補正とを分離して計算することができる。特にカラー8重項状態を中間状態として含む効果を取り入れることができる点が、今までにこの過程の計算で考慮されていなかった新しい点である。考慮した高次補正は、bクォークからsクォークの転換に伴うパーテックス補正と、B中間子中の軽いクォークにかかわるスペクテータ補正の寄与に分類でき、 $B \rightarrow K11$, $B \rightarrow K*11$ 過程について、それぞれのハード領域とソフト領域の寄与を計算した。その結果、ハード・パーテックス補正とソフト・スペクテータ補正が大きな寄与を与えること、またこれらの寄与から大きな虚数部を持った振幅が生じる可能性があることが分かった。また、 $B \rightarrow K(*)J/\psi$ や $B \rightarrow K(*)\psi'$ の分岐比を計算し、因子化による最低次の計算結果と比較した。ここで扱っている近似では、さらなる高次補正やB中間子の形状因子に起因する大きな理論的不定性が残るが、 $B \rightarrow KJ/\psi$ や $B \rightarrow K\psi'$ の分岐比に関しては実験と理論の一致が改善される傾向にあることが示めされた。この結果は、この過程に対するカラー8重項状態の効果を取り入れた最初の計算としては、現象論的にも示唆に富む、興味深いものである。今後、実験データが詳細になるにつれて、 J/ψ や ψ' 領域の不変質量分布の情報が得られることが期待され、理論の予言と比較することが可能になる。さらに、 $B \rightarrow K(*)11$ 過程から新しい物理の効果を引き出す際にも、近距離の崩壊振幅と J/ψ や ψ' を中間状態とする崩壊振幅の干渉の理解が必要になるため、この計算結果は有意義な情報を与える。Paul Posch 君はこの研究の予備的な結果を学会等で既に発表している。研究内容は今後、学術論文としてまとめる予定である。以上のように、この研究は当該分野の新しい学問的知見を含んでおり、博士論文に合格と判断した。